

# 城市机器人的应用与空间应对研究综述

梁佳宁 龙 瀛

## Review of Studies on Robot Application in Urban Space and Its Response

LIANG Jianing<sup>1</sup>, LONG Ying<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Hang Lung Center for Real Estate, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Key Laboratory of Eco-Planning & Green Building, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Robots are entering from factories and laboratories into the urban space, to improve its smart governance and service, alleviate the aging pressure, and promote sustainable and resilient urban development. The application of urban robots has become an inevitable trend in the future development of cities. Like other disruptive technologies, its application will reshape urban life and urban space, but the existing research lacks a discussion on its relationship with urban space. Our research defines the concept of “urban robots” and constructs a feature analysis framework to describe the workflow of urban robots, covering its physical, social, and digital attributes, through a systematic literature review of 78 WoS core collection literatures. Based on the framework, this paper further summarizes the characteristics of urban robots, six of their application areas as well as spatial problems they face such as diverse obstacles, lack of structural rules, and a high likelihood of cross interference. Finally, in order to solve the spatial problems faced by urban robots and place some limits on their behaviors, this paper, based on design cases, proposes exploratory strategies for urban space response and coordination, so as to promote thinking about future urban space design.

**Keywords** urban robots; future cities; smart cities; spatial response; literature review

### 作者简介

梁佳宁, 清华大学建筑学院;

龙瀛 (通讯作者), 清华大学建筑学院, 清华大学恒隆房地产研究中心, 清华大学生态规划与绿色建筑教育部重点实验室。

**摘要** 机器人正由工厂和实验室进入城市空间, 提高城市智慧治理和服务水平, 缓解老龄化压力, 促进城市可持续韧性发展等。城市机器人的应用已成为城市未来发展的必然趋势。与其他颠覆性技术相同, 其应用也将重塑城市生活与城市空间, 但既有研究缺乏对其与城市空间关系的讨论。文章界定了“城市机器人”的概念, 通过对 78 篇 WoS 核心合集文献进行系统性文献综述, 构建了描述城市机器人工作流程并涵盖其物理、社会、数字属性的特征分析框架; 进一步基于框架总结出城市机器人的特征及六大应用领域和面临的障碍繁杂、缺乏结构规则、易产生交叉冲突等空间问题; 最后, 为解决其面临的空间问题同时对其行为作出一定限制, 结合设计案例提出城市空间应对协调的探索性策略, 以期为未来城市空间设计提供思考。

**关键词** 城市机器人; 未来城市; 智慧城市; 空间应对; 文献综述

## 1 引言

20 世纪 90 年代以来, 机器人开始在工业领域补充、取代甚至拓展人类的工作, 而当下, 机器人及自动化系统 (Robotics and Autonomous Systems, RAS) 技术已被认为是对世界产生重大影响的颠覆性技术之一 (Manyika et al., 2013)。随着第四次工业革命中物联网、5G、人工智能、云计算等技术的进步, 机器人的感知定位、人机交互和智能控制能力均得到巨大提升, 并从工厂内部走向更开放和复杂的城市空间: 送货机器人和无人机在街道及空中加快

配送货物的速度 (Lavaei and Atashgah, 2017), 机器人成为救援队伍中的抢险队员 (Messina and Jacoff, 2007), 各类社交机器人承担起警察 (Rahman et al., 2016) 和社区医生 (Grigorescu et al., 2019) 的角色, 为弱势群体提供了更多便利 (Wei et al., 2013) 等, 这不仅极大地提升了城市的生产水平和城市居民的生活品质, 也有助于提升能源效率并降低服务业的碳排放 (Grau et al., 2018)。疫情期间, 为满足无接触要求, 机器人承担了更多的工作, 如消杀、无接触配送货物甚至社交距离监督 (Bruno et al., 2019) 等, 可以有效增强城市韧性以应对诸多突发状况。

许多国家和地方政府已经开始将机器人技术作为提高城市智慧治理水平的重要手段。例如, 纽约构建水质机器人监测网络, 作为城市智能基础设施的一部分; 迪拜提出基于机器人技术的自动交通战略 (Golubchikov and Thornbush, 2020); 日本在“社会 5.0 愿景” (Society 5.0) 中提出城市机器人的应用将有助于建成“以人为本的超智能社会” (周利敏、钟海欣, 2019)。大量智慧城市项目也将机器人纳入未来城市生活的场景, 如“编织城市” (Woven City) 描绘了使用机器人建造建筑, 送货机器人在城市中穿梭的场景 (Toyota, 2020); “釜山智慧城市” (Busan Eco Delta Smart City) 应用多种机器人提高市民生活质量, 包括提高生活体验、保障弱势群体 (Smart City Korea, 2018)。

在我国, 机器人产业是国家长期推动的重点领域之一, 《“十四五” 机器人产业发展规划》(工信部联规〔2021〕206号) 提出“机器人应面向家庭服务、公共服务、医疗健康、养老助残、特殊环境作业等领域需求”, 并强调机器人在城市中应用可有效应对人口老龄化问题, 提高生产水平和生活品质, 促进经济和社会可持续发展。我们与机器人共同生活工作的场景, 将在不远的未来成为常态。

规划师应超前认识到其对城市可能产生的影响和挑战。一方面, 机器人作为颠覆性技术之一将从多个维度重构城市生活, 如自动化生产流程和无人化服务提供将改变城市生产与消费的过程, “机器代人” 又将影响人们工作的行为方式, 其在提供服务的过程中将可能与人类产生交流和互动进而改变传统的互动与空间使用方式 (特别是公共空间) 等, 这些过程最终将投影于城市物理空间的变化; 另一方面, 机器人本身作为空间实体将占据物理空间, 并与既有主体产生空间的交叉共享, 进而以类似于汽车重新安排街道的方式影响城市空间, 因此, 城市面临为机器人实验和推广再次分配空间的挑战。

既有关机器人城市关系的研究多从伦理道德 (Sanfeliu et al., 2010; Sindi et al., 2018)、人群接受度 (Hayashi et al., 2011)、技术应用 (Liu et al., 2020; Tiddi et al., 2020) 以及落地实践 (While et al., 2021) 等方面进行讨论, 但对其与城市空间的关系缺乏关注。针对这一研究空白, 本文通过系统性文献综述的方法, 构建基于描述城市机器人工作流程的特征分析框架, 总结机器人应用现状及空间需求, 并结合落地实践或未来城市空间构想案例提出城市空间应对策略, 以期对未来城市空间设计提供探索性思考。

## 2 研究方法与设计

对本文研究核心“城市机器人”进行概念界定, 即在“城市空间”中执行任务的“机器人”。“城

市空间”主要包括城市公共空间（城市街道、广场绿地及公共建筑周边）（Pratt et al., 2002）以及城市基础设施内外部空间。而“机器人”为可自主感知、决策并实施动作的物质实体（Tiddi et al., 2020）。虽然无人驾驶车辆具有相似的工作流程和特点，但其具有相同的物理设计（可容纳乘客的内部空间及车轮）和空间影响（主要为交通空间），且既有研究讨论较充足，因而不纳入本文研究范围。

## 2.1 系统性文献综述

为全面梳理城市机器人应用情况,本文采用系统性文献综述法(Systematic Literature Review, SLR)（图1），选取 WoS 核心合集数据库（Web of Science Core Collection），初期检索发现 2000 年前机器人尚未广泛应用于城市环境，且机器人技术发展迅速，较早文献借鉴意义不大，因此选择 2000 年 1 月 1 日~2022 年 6 月 1 日的文献进行检索。选取关键词“robot\*”（以涵盖 robot[s]、robotic[s]、robot-based 等）与“city OR urban”进行检索，并对文献类型、语言类别等加以限制。根据检索标准进行初步检索，共检索到 311 篇文献，通过对题目、摘要、全文进行详细阅读后，剔除掉不满足上文对“城市空间”和“机器人”定义的文献，最终选取符合要求的 78 篇文献。

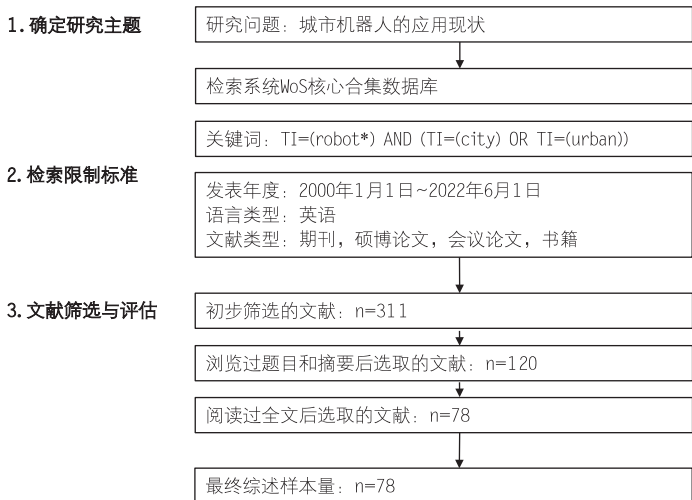


图1 系统性文献检索流程

## 2.2 城市机器人特征分析框架

为得出城市机器人的工作属性特征及其面临的空間问题，本文从城市机器人工作流程角度出发，建立一个特征分析框架对文献进行深入分析。

框架构建参考了既有文献中的相似研究和概念定义，如“城市—机器人互动过程”（Robot-City

Interaction) 包括三个互动主体, 即机器人、城市和信息数据 (Tiddi et al., 2020); 服务机器人是连接数字、物理和社会空间的智能执行体, 可建立人、环境和机器人三者的互联机制 (徐一平、董怀文, 2021) 等。在此基础上, 本文进一步将城市机器人的特征分析框架解构为三个属性 (图 2): 物理属性, 指城市机器人作为空间实体, 在工作过程中会表现出对城市空间不同的适应性 (1. 形态特征), 执行任务时如何感知物理空间并移动 (2. 导航方式); 社会属性, 即其执行任务时与人的关系, 包括其活动空间与人群活动的交叉程度 (3. 活动空间) 以及服务时与人如何交互 (4. 与人互动); 数字属性, 指其在导航或服务对象的数据采集过程中是否与数字基础设施或其他机器人进行数据共享 (5. 信息共享)。整体特征分析框架如表 1, 各特征的具体分类则在既有理论上结合本次样本文献分析进行了调整。

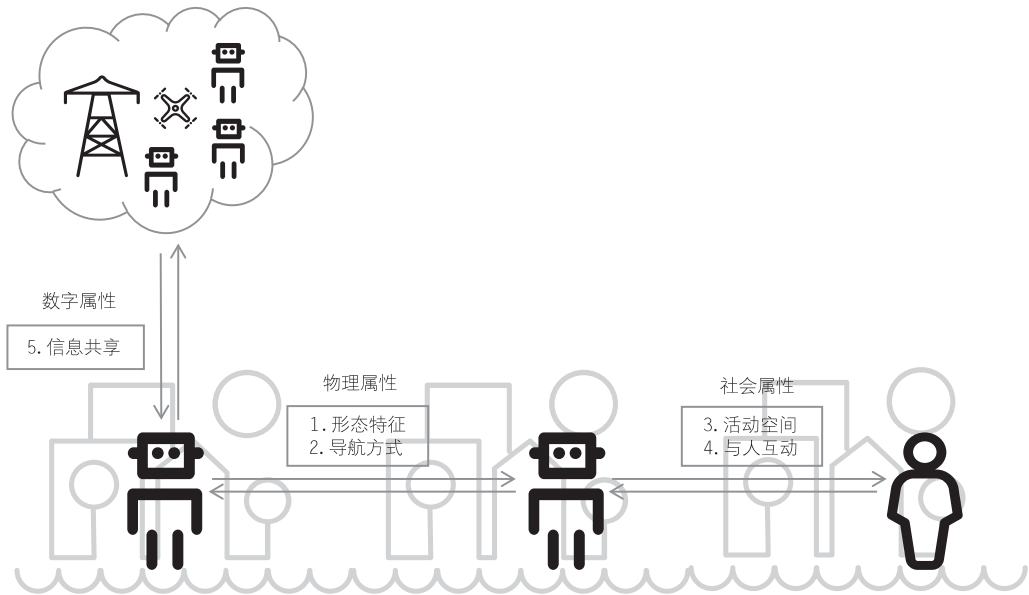


图 2 城市机器人属性框架概念

### 3 城市机器人应用现状

#### 3.1 文献计量分析

对 78 篇文献发表年份进行统计 (图 3), 机器人与城市相关的研究多集中在近十年 (56 篇, 71.79%)。“9·11”事件中机器人辅助搜救发挥出巨大作用, 这也带动了 21 世纪初对军事机器人进入城市环境的研究热潮 (Pratt et al., 2002)。而随着物联网、人工智能技术成熟以及“工业 4.0”“智慧城市”等概念的提出, 相关文献数量在 2010 年、2018~2020 年两次出现大幅增长的情况。

表 1 城市机器人特征分析框架

属性	特征指标及理论支持	具体分类		
物理属性	1. 形态特征 (Scholtz, 2003)	地面	不可移动式	
			可移动类人形	
			可移动轮式	
			腿式机器人	
			履带机器人	
	空中			
	水中			
	2. 导航方式	射频识别导航		
		激光导航		
		视觉导航		
GPS 导航				
超声波导航				
社会属性	3. 活动空间 (吴伟, 2012)	公共性高	城市空域	
			城市街道	
			城市广场公园	
		公共性较高 (公共建筑周边及内部空间)		
	公共性低 (如城市基础设施内外部空间, 非管理人员不得进入的空间)			
	4. 与人互动 (Hüttenrauch et al., 2006)	亲密互动 (如操作界面或交换物品等)		
		社交互动 (互动过程中需采集一定人类信息, 如手势互动、语言沟通、面部识别等)		
公共互动 (如通过灯光、蜂鸣声等进行互动)				
不互动				
数字属性	5. 信息共享 (Tiddi et al., 2020)	同类型机器人共享信息		
		不同类型机器人/设施共享信息		
		不共享信息		

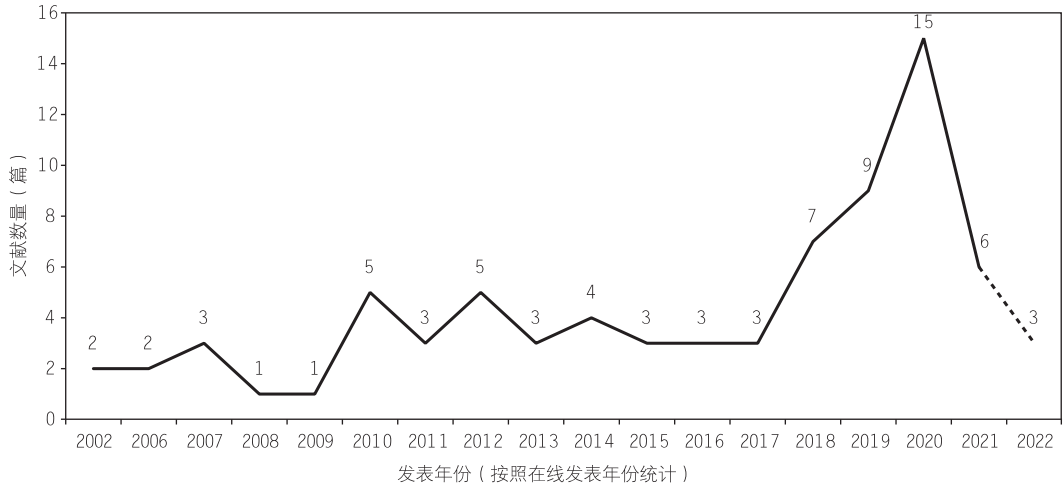


图3 文献计量分析:发表年份

对样本文献研究领域进行统计(图4),主要研究来自计算机科学(40篇,51.28%)、工程学(31篇,39.74%)、机器人学(30篇,38.46%)、自动化和控制系统(14篇,17.95%)几个领域,少数研究来自城市研究(4篇,5.13%)和建筑学领域(2篇,2.56%),证明城市研究领域对于机器人的应用关注仍较少,但呈上升趋势(其中3篇发表于2020年)。

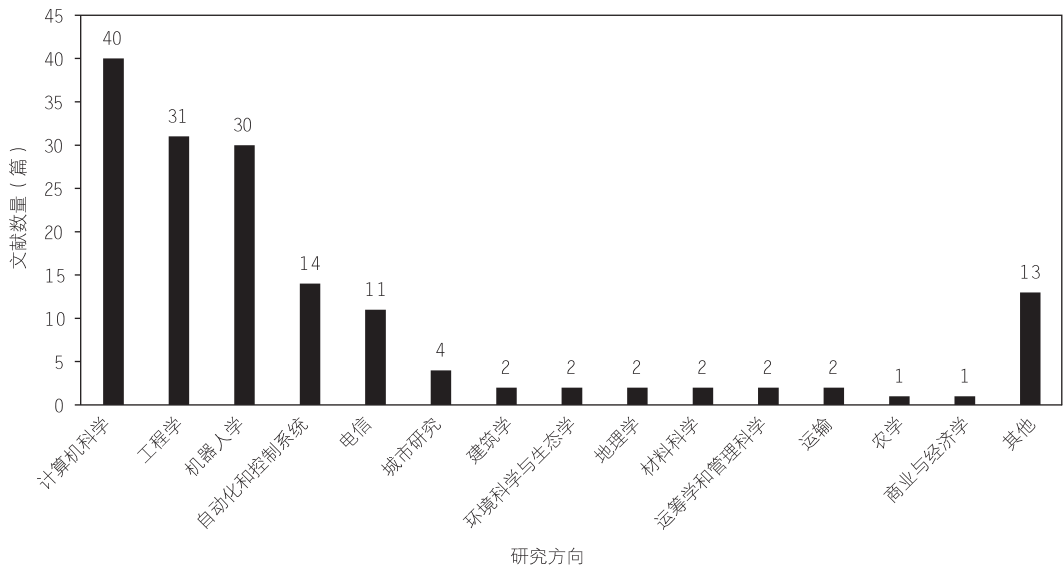


图4 文献计量分析:研究方向

研究国家多为英国（9篇，11.54%）、美国（7篇，8.97%）、中国（6篇，7.69%）和韩国（6篇，7.69%）等（图5），这些国家的机器人产业基础较好，并将机器人技术应用作为智慧城市发展策略的一部分，如“智慧伦敦我们在一起”（Smarter London Together）（Greater London Authority, 2018），“更绿色更美好的纽约”（A Greener, Greater New York）（City of New York, 2007），“釜山智慧城市”（Smart City Korea, 2018）等。

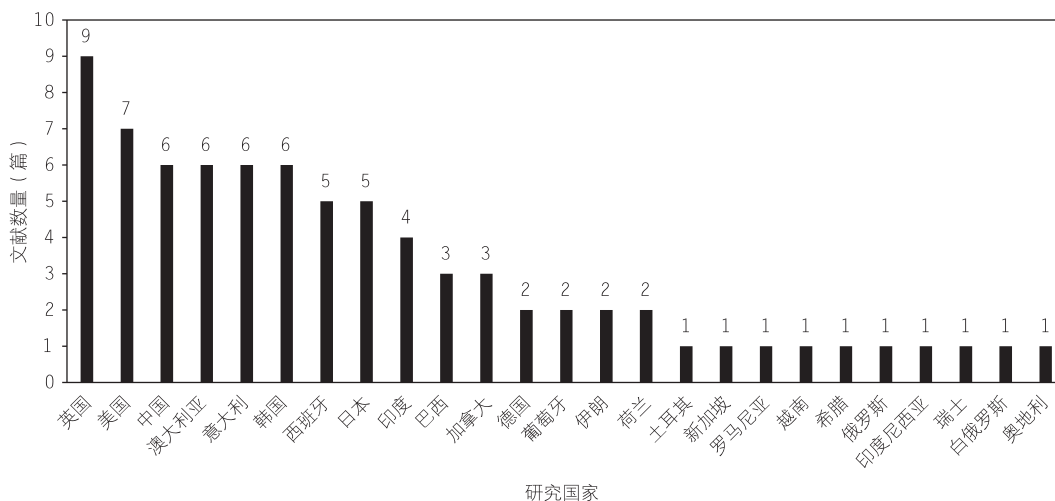


图5 文献计量分析：研究国家

注：优先按照实验地点统计，若文中未作说明则按第一作者国籍进行统计。

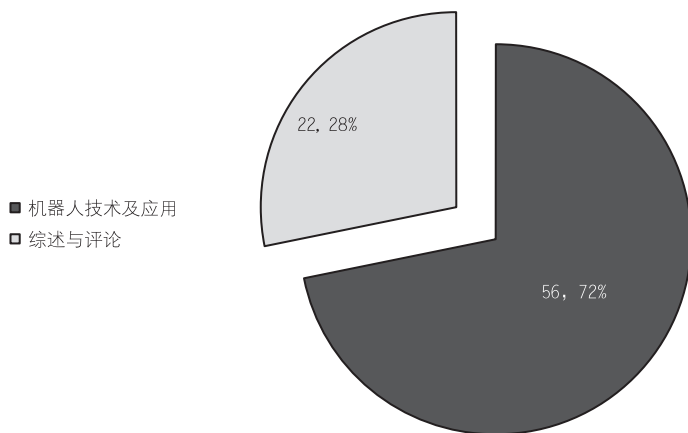


图6 文献计量分析：研究内容

样本文献中,大多数研究关注机器人本身的技术及应用(56篇,72%),其余文献则关注城市机器人应用产生的影响,包括对使用人群的心理影响(Tay et al., 2018; Hayashi et al., 2011),对隐私伦理等问题的讨论(Sanfeliu et al., 2010; Sindi et al., 2018),以及对相关法律法规的讨论(Salvini et al., 2010),对生态环境的影响(Goddard et al., 2021)等(图6)。

### 3.2 特征分析结果

通过2.2中的特征分析框架对关注城市机器人技术及应用的56篇样本文献(图6)进行特征提取,结果如图7所示。

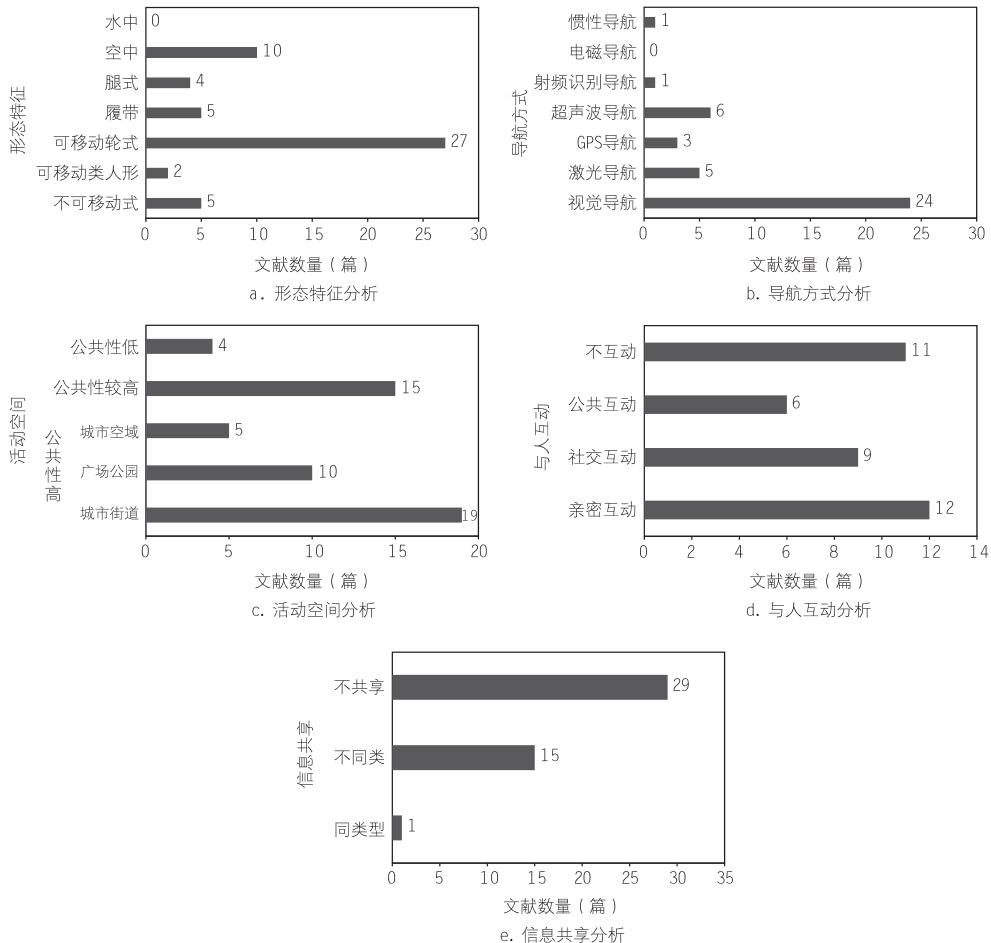


图7 特征分析结果

注:若一篇文章提及多个机器人则对其特征属性进行分别计数,未提及该属性则不计数。



物理属性方面,城市机器人形态以地面轮式机器人为主,而空中机器人数量也在增加。导航方式多以视觉为主,多种传感器辅助,由于在城市地区,复杂的建筑遮挡导致机器人仅使用GPS定位性能显著下降(Georgiev and Allen, 2002),因此呈现出与其他户外机器人不同的导航方式。但在条件允许时(如开敞空间),GPS导航方法仍适用(Capi et al., 2014)。社会属性方面,公共性高的街道空间是最常见的城市机器人活动空间,其多使用人行道空间进行移动或提供服务,与人群活动的交叉度很高。在与人互动方面,以界面操作和交换物品为主,多为亲密互动。但也存在很多城市机器人不与人互动的情况,如负责基础设施维护等工作的机器人。数字属性方面,大多数城市机器人仍采用独立采集信息并执行任务的工作方式,但随着物联网技术的成熟,越来越多机器人开始与同类机器人或多元异构设施共享数据。

总体而言,城市机器人目前主要以轮式形态为主,将街道尤其是人行道空间作为主要的移动和提供服务的空间,并需要与人群进行高频的亲密互动,且具有联网共享数据的发展趋势。

### 3.3 城市机器人应用领域及特征

本文进一步按照城市机器人的不同应用领域对文章进行分类梳理,并介绍各领域城市机器人的应用现状及特征。结合既有研究分类方法(Golubchikov and Thornbush, 2020; Kapitonov et al., 2019; Macrorie et al., 2021; Puig-Pey et al., 2017; Rivera et al., 2020; Tiddi et al., 2020)(表2)及本次样本文献情况,本文将其归纳为:城市安全警务,基础设施建造与维护,陪伴与帮助,场所营造,城市治理,智慧交通。统计得出城市机器人较多应用于城市安全警务以及陪伴与帮助领域(图8),这与军事机器人和室内服务型机器人发展较成熟并较早进入城市空间的发展路径相符。进一步通过2.2特征分析框架对各应用领域文献分别进行特征提取,以便更清晰全面地展示城市机器人在不同领域的应用现状。

#### 3.3.1 城市安全警务

该领域既包括灾害时期对救援对象的定位、医疗和解救工作(Urban Search and Rescue, USAR),也包括日常维护城市安全工作。在灾后救援过程中,城市机器人任务一般包括自主导航进入倒塌建筑中,找到受害者并监测人员生命体征,提供食物和通信,识别后续可能的危险(声、热、危险品、地震等),必要时需提供结构支撑(Dissanayake et al., 2006)。此类城市机器人包括多种形态,如水中、空中、地面,以执行不同类型工作(Messina and Jacoff, 2007),其中地面型多为履带和轮式(图9),履带可以帮助其越过楼梯等障碍,适应复杂的灾后环境。在数字和社会层面,多采用同种或多种机器人的团队作业方式,常与消防员进行数据共享或远程操控。此类城市机器人需要通过监测体温或识别声音、运动状态等方式来识别被困者,因此常搭载多种传感器,包括(红外)照相机、声呐、激光扫描仪、雷达等。

表2 城市机器人应用领域分类依据

既有研究	类别	信息与通信技术 (ICT)	智慧交通 (Mobility)	城市基础设施 (Infrastructure)	社会服务 (Citizen Assistance)	城市安全警务 (Urban Security and Policing)	医疗健康 (Health Care)	旅游与环境 (Tourism and environment)	城市治理 (Governance)	农业 (Agriculture)	经济活动 (Economy)	教育 (Education)
Puig-Pey et al.,2017	3	√	√	√								
Rivera et al.,2020	10	√	√		√	√	√	√		√		√
Tiddi et al.,2020	6		√		√			√	√		√	
Kapitonov et al.,2019	3		√			√					√	
Macrorie et al.,2021	6		√	√	√	√	√					
Golubchikov and Thornbush, 2020	5	√	√	√					√			√
频次		3	6	3	3	3	2	2	2	1	2	2

注：“√”表示该文献分类包含此项。

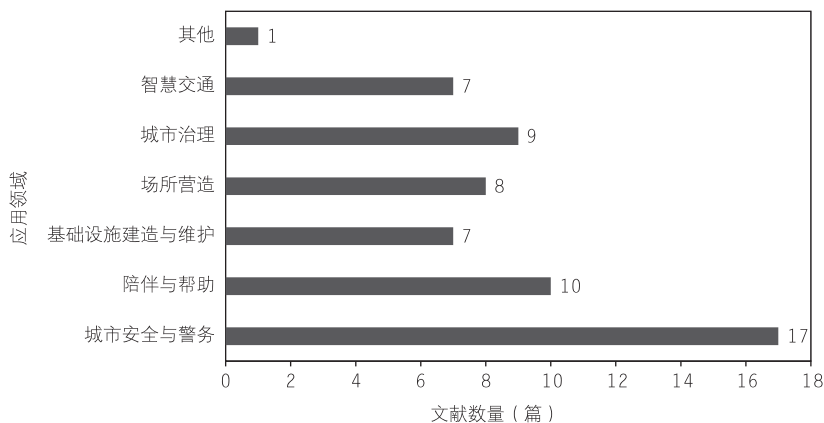


图8 样本文献各领域分类数量

注：若一篇文章同时探讨城市机器人在多个领域中的应用则重复计数。

日常城市安全维护工作则包括对特定环境巡逻 (Choe and Chung, 2012; Ermacora et al., 2016; Rahman et al., 2016), 追踪特定目标人员 (Leong et al., 2021; Merino et al., 2012), 通过无人机或地面机器人监测危险气体 (He et al., 2019; Liu et al., 2011) 等。疫情期间, 城市机器人也被用于监测并提醒人群保持安全社交距离 (Bruno et al., 2019)。此类机器人多为轮式或腿式, 以达到快速移动的目的。

### 3.3.2 陪伴与帮助

城市机器人应用有助于提高城市包容性, 即对老年人、残疾人等弱势群体提供援助或陪伴。比如通过自移动小型车辆或自移动轮椅 (Hashimoto et al., 2014; Yokozuka et al., 2012) 提高弱势群体移动性; 电子导盲犬式机器人则通过绳索或操纵杆实现为视障人士的导航 (Wei et al., 2013)。此外, 日常医疗服务也可通过机器人提供, 如移动健康亭 (Grigorescu et al., 2019), 并可进一步建立健康物联网 (Internet of Health Things, IoHT) (Calp et al., 2022) 构建分布式医疗体系。此类机器人需要与人类进行亲密互动, 如通过接触和压力感应检测血氧饱和度、体重指数等体征信息, 或识别面部获得人的情绪状态 (Grigorescu et al., 2019), 因此常搭载热像仪、压力传感器并具备声音和自然语言识别及回答功能 (Capi et al., 2014)。

### 3.3.3 基础设施建造与维护

机器人在危险、精细或枯燥的工作方面常常表现优于人类, 因此越来越多地被应用于城市基础设施建造与维护。建筑工程施工中已广泛应用机器人进行砌砖、混凝土打印或木材制造, 既可提高生产效率, 也可进行定制化设计, 如利用砌砖机器人建造非标准化立面 (Fleckenstein et al., 2022), 或未来使用无人机进行模块化建造 (Willmann et al., 2015)。在基础设施日常维护方面机器人同样发挥着作用, 如高层建筑检查、喷漆、核设施维护、飞机的检查 (Saboori et al., 2007), 城市架空线路的检

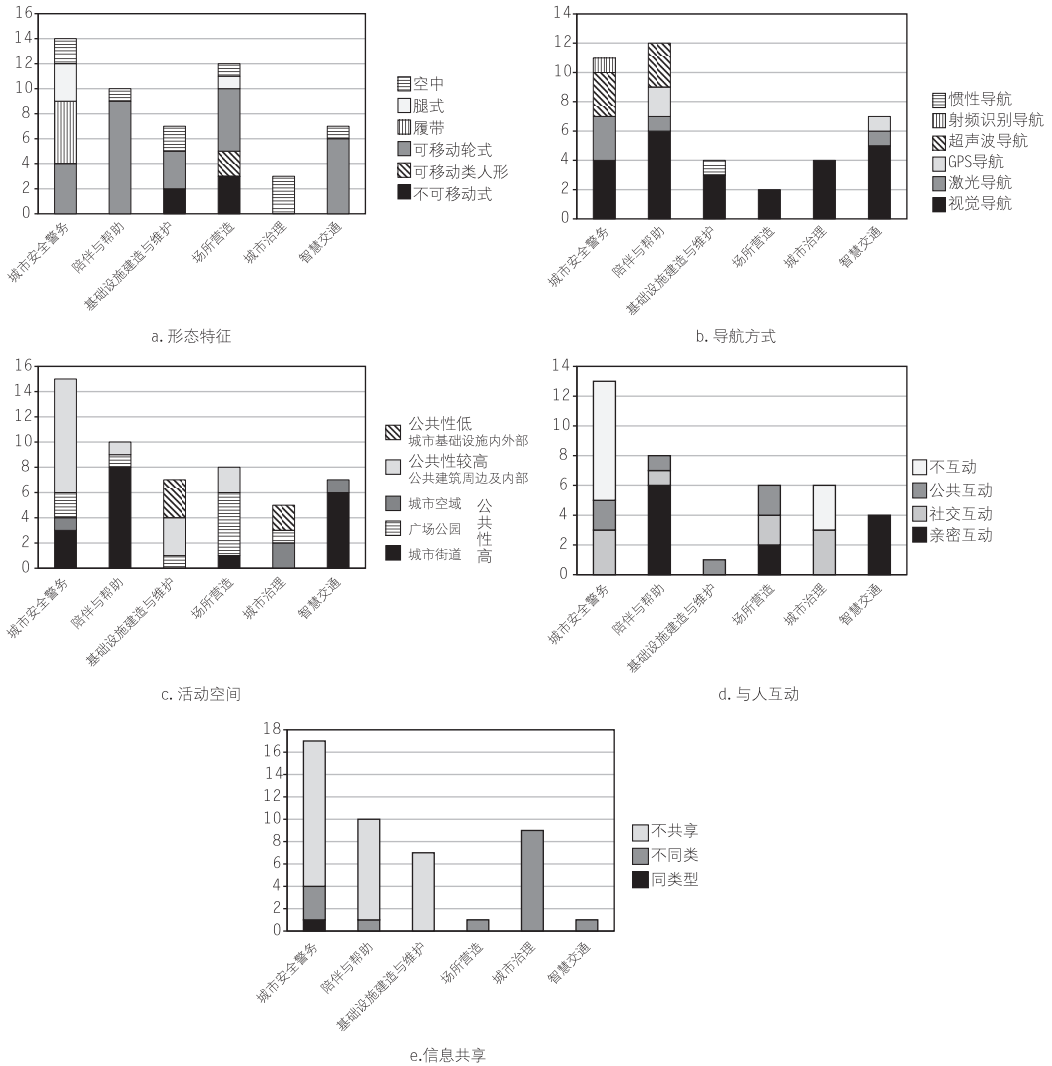


图9 各领域城市机器人特征分析

测 (Bianchi Filho et al., 2018), 下水道检查和维护 (Grau et al., 2017; Le and Ngo, 2019), 绿地的浇灌维护 (Gravalos et al., 2019) 等。此类机器人多在基础设施内外部空间活动, 因此与人的互动程度低, 并较少进行数据共享 (图9)。

### 3.3.4 场所营造

场所营造指通过人机互动过程, 增强场所的娱乐趣味性和舒适性。具体包括: 提供语音导览和问

询服务 (Sato-Shimokawara et al., 2008); 基于屏幕的互动与展示, 作为碎片化媒介替代传统的展示方式, 如无人机群、带有屏幕的地面移动机器人等 (Hoggenmueller et al., 2019); 基于机械活动的互动, 如感知人群活动而改变形态的天花板机器人 (Ergin et al., 2018), 或在地面作画的机器人 (Hoggenmueller and Hespagnol, 2020)。这类人机互动被证明可以促进人群的心理健康 (Biloria and Dritsa, 2018; Kim et al., 2010)。此类城市机器人需要与人群互动, 因此常具有识别手势和语言的能力 (Sato-Shimokawara et al., 2008)。

### 3.3.5 城市治理

新型智慧城市治理旨在运用信息技术手段解决目前城市中各类资源调控不佳所带来的如环境污染、交通堵塞等问题。在物联网 (Internet of Things, IoT) 技术已广泛应用的当下, 机器人作为新兴分布式设备, 具有传感、计算及执行能力, 可作为物联网的节点, 采集相比传统静态传感器更大范围、更高频率的数据 (Bardaro et al., 2022)。机器人物联网 (the Internet of Robotic Things, IoRT) 的概念由此出现 (Liu et al., 2020), 这不仅有助于更广泛的数据采集, 也可以降低机器人自身的运算负荷, 利用来自其他智慧城市的基础设施信息 (Beigi et al., 2017) 及多元异构互联网提供商的开放数据 (Ermacora et al., 2016), 有效拓展机器人的能力。如机器人移动过程可以使用来自智能交通信号灯的数据来优化路线, 管理者也可以根据机器人监测人群活动的数据对不同区域采取不同安保措施。具体而言, 分布式城市机器人可实时收集交通、行人、气候和污染的数据, 以支持停车位分配、街道清洁、公园管理、货物运输等工作 (Abbasi et al., 2018; Roldán-Gómez et al., 2020)。在人员密集的公共场所内, 城市机器人可不间断巡逻, 采集视频数据, 并与固定摄像头结合, 支持特定人员追踪 (Merino et al., 2012), 统计特定场所人数 (Beigi et al., 2017), 向人群提供引导服务 (Rahman et al., 2016) 等, 人们也可以使用智能设备发送求助信息等 (Ermacora et al., 2016)。空中机器人是组成机器人物联网的主要形态类型 (图9)。

### 3.3.6 智慧交通

机器人自身的灵活移动性可作为城市交通的补充, 包括对人和货物的运输, 以及作为智慧化交通调节手段减少交通拥堵, 提高运输效率和安全性。目前机器人已广泛应用于货物的运输配送, 如采用无人机运送货物以及药品等紧急物品 (Lavaei and Atashgah, 2017), 使用地面轮式机器人运送食品外卖或快递等 (Byun et al., 2010; Corno and Savaresi, 2020; Silvestri et al., 2019; Valdez et al., 2021; Bakach et al., 2021)。已有许多机器人货运方面的商业实践, 如“Starship” (Valdez et al., 2021)、“Kiwi” (While et al., 2021) 等公司已将其部署于大学校园或部分城市道路。一般使用传统货车运输机器人和货物到中转站, 后由城市机器人负责最后一公里的无人化交付 (Bakach et al., 2021)。疫情期间, 无接触要求下机器人配送发挥了极大作用, 这是对市场、政府和志愿者主导下供给网络的有效补充, 对弱势群体尤其重要 (Valdez et al., 2021)。除货物配送外, 城市机器人还可通过与交通设施交互, 采集交通流量信息, 引导行人安全通过路口 (Shut and Kasyanik, 2013) 等。此类城市机器人多使用街道空间中的人行道空间, 并需要与人类进行接触类的亲密互动。

### 3.4 城市机器人应用产生的争论

尽管机器人应用于城市各领域并被认为是可以解决诸多城市问题，仍有很多学者对其持怀疑态度。结合关注城市机器人应用产生影响的 22 篇文章（图 6），本文将目前存在的主要争论总结为两方面：

一方面，城市机器人与人的关系存在争议。第一，其广泛应用可能反而会加剧不平等现象。智能机器人可能变为财富集中者的新玩具，进而占用更多的城市空间并区别化地提供城市服务（Loke, 2019）。而对弱势群体来说，其使用在线资源的能力较差，更难以获得自动化服务（Valdez et al., 2021）。第二，在伦理道德方面，城市机器人在采集人群信息时面临可能侵犯数据所有权、隐私权等诸多问题（Sanfeliu et al., 2010; Sindi et al., 2018）。第三，在人与城市机器人共享城市空间的过程中，机器人的被接受程度仍较低，人也许并不希望与机器人沟通或为其提供方便，甚至可能会无意识产生“欺凌”行为，如对其击打或阻挡等，进而为机器人在城市环境中大量部署造成困难（Salvini et al., 2010）。

另一方面，城市机器人的应用缺乏法律法规支持。城市机器人虽具有自主能动性但仍属于财产物品，对人和物品造成损害的责任存在缺失（Salvini et al., 2010）。同时，其对城市空间的占用普遍缺少法规支持：我国仅部分区域颁发管理办法，如北京市高级别自动驾驶示范区发布《无人配送车管理实施细则》试行版；意大利不允许自主移动机器人在公共道路上行驶（Salvini et al., 2010）；美国仅部分州允许机器人在人行道上进行运营（While et al., 2021）。

## 4 城市机器人应用下城市的空间应对

城市机器人作为空间实体将占据物理空间，与人互动方式决定了其与人群的空间划分，而其数字属性将影响智慧城市建设的数字基础设施底座。在历次技术变革中，汽车、电梯等技术已经对人们的生活方式和城市形态结构产生了颠覆性改变，而当下，城市机器人的广泛应用已势不可挡，城市空间可能会被再次重塑。

纳根堡（Nagenborg, 2020）提出疑问：“我们应该为机器人建造城市，还是为城市建造机器人？”答案可能并非是非单一选项。机器人已不断地在外观、技术等层面迭代更新以适应城市环境（Förster et al., 2011），同时机器人服务将会切实提高居民生活的便捷指数且将影响城市空间，双向的适应与应对也许是最终的答案。城市空间可以一定程度上解决其面临的空间问题，同时也需要对其行为作出一定限制，以规避技术应用的负面影响。建筑师和规划师在解决城市机器人应用产生的空间问题中将扮演重要的角色（Nagenborg, 2020）。

本文基于样本文献特征分析总结出城市机器人在应用过程中面临的空间问题，并尝试提出空间应对策略。由于目前对于城市空间应对的研究文献较缺乏，本文进一步以“机器人”和“空间”等为关键词补充查找了相关落地实践或未来城市空间构想案例，以支撑应对策略的提出。

## 4.1 城市机器人应用面临的空間问题

通过上文对城市机器人的特征分析，可以发现其将工作场景转换至城市环境面临诸多不适应（图 10）。物理空间层面，城市环境相对一般户外环境具有更细碎复杂的障碍，包括路缘、楼梯、管道和电线等（Pratt et al., 2002），这对多为轮式形态的城市机器人并不友好。同时，城市机器人活动的空间缺乏结构和规则，加剧了其行动的困难（Sabatini et al., 2018），并易造成城市空间的混乱。社会层面，目前城市机器人的主要活动空间为街道空间和低空空域，这不仅可能“侵犯”市民的空间权利，也在二者活动交叉时带来安全隐患。而数字层面，多数城市机器人在工作时并不进行数据共享，可能导致异构机器人在同一空间工作时存在空间冲突，并降低其工作效率。同时，城市环境是高度动态且信息量巨大的，这些不确定性（如突然出现的车辆、人群）会给单个城市机器人带来巨大的计算压力（Tiddi et al., 2020）。

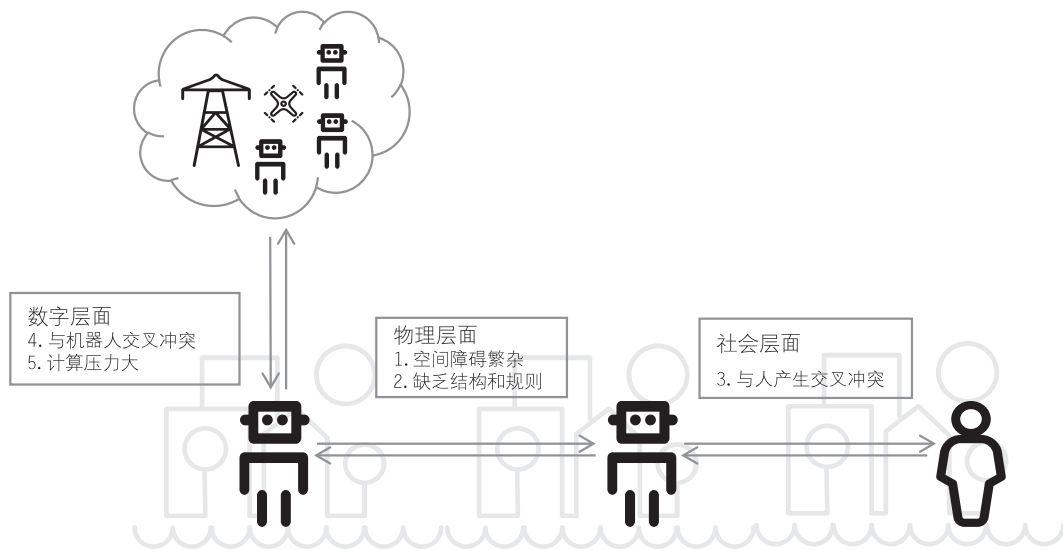


图 10 城市机器人面临的空間问题

## 4.2 城市空间应对策略

针对上述城市机器人应用面临的空間问题，本文提出营造无障碍专用空间及完善公共空间治理规则策略以解决物理和社会层面问题，配套新型智慧基础设施策略以解决数字层面问题，设置优先试验区域以支持城市机器人应用的空间过渡（图 11）。

### 4.2.1 营造无障碍专用空间

针对城市机器人面临的障碍过多、结构不清、与人交叉冲突的问题，可结合既有空间为机器人创

造利于其移动的无障碍空间，并将其视为城市基础设施中的一环，具体包括地下空间、垂直设施空间和地面空间。

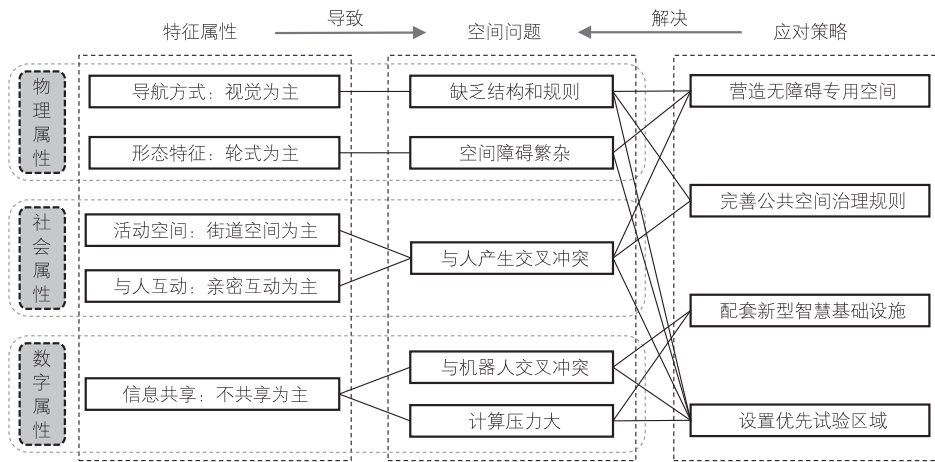


图 11 城市机器人特征属性、面临的空間问题及城市空間应对策略间的关系

城市地下空间开发是目前城市建设的热点，也是提高土地利用效率的有效措施，同时地下空间具有相对隔离、对建成环境影响较小的优势。城市机器人可进一步提高地下空间利用率并实现移动无障碍和导航简化。瑞典 Cargo Sous Terrain 项目即在区域尺度建设地下系统利用机器人实现快速货运，地下空间将与现有物流中心形成新的枢纽（Cargo Sous Terrain, 2017）（图 12）。智慧城市多伦多（Sidewalk Toronto）项目中地下隧道与社区内建筑连接，机器人可通过货运电梯到达各个楼层进行全时段货物配送及提供服务（Sidewalk Labs, 2019）。实践层面，城市机器人地下空间可结合地铁空间、地下综合管廊空间（中国雄安，2020）等既有地下空间，进一步降低应用成本。

机器人在垂直空间的移动也可利用现有的垂直设施空间解决。韩国科技公司 Naver 在“世界第一座机器人友好大楼”（Robot-friendly Building）核心筒中设置专供机器人使用的电梯和走廊（Kim, 2021），或依托建筑物墙体集成机器人坡道，保证机器人可以到达各层区域，并与人员路线分离（Archdaily, 2021）（图 13）。

地面空间中人行道空间是目前城市机器人活动的主要空间，因此首先需对现状人行道情况进行提升，减少移动障碍，具体提升指标可参考科尔诺等（Corno and Savaresi, 2020）对人行道“可行性指数”（Feasibility Index）的研究，包括提升人行道的宽度、减少穿过人行道的车道和人行道的数量以及人行道表面的坑洞数量。创造连续无高差宽阔平整的人行道空间也符合世界卫生组织对于“老龄友好城市”的要求（World Health Organization, 2007）。其次，在道路结构上，可利用地面交通空间为机器人设置专用移动路线，如设置机器人、自行车共享车道或机器人专用道（Smart City Korea, 2018）



(图 14)，或在机器人与人的共享空间中布设高饱和色彩专属地标或线条等，便于其视觉导航。



图 12 城市机器人利用地下空间示意：Cargo Sous Terrain

资料来源：Cargo Sous Terrain (2017)。

#### 4.2.2 配套新型智慧基础设施

一方面，高频多变的城市环境要求机器人具备强大的计算能力，而基础设施智能数字网络的搭建能够满足机器人与城市环境之间高频巨量的数据交换的需求，使分布式城市机器人动态收集信息，并融合多源数据，最终确定最佳行动路线并执行任务。具体应保证交通信号灯、固定监控摄像头、出入口、电梯等各种城市设施均可与城市机器人进行通信，实现其在数字层面的行动便利。另一方面，城市机器人的数量和种类将随着技术发展与时间推移逐渐增长及丰富，运营阶段还将面临新旧机器人更替迭代的问题。这需要数字网络平台对其进行统一调度，加强不同运营商下机器人群体的工作协调与融合，确保共享空间的高效使用，并有助于异构多功能机器人聚集互补，共同完成一些临时且大型的工作，提升单个机器人利用效率和机器人系统的综合能力。许多项目配套了此类数字网络平台，如“釜山智慧城市”（Smart City Korea, 2018）设置机器人控制中心，美国国家航空航天局（NASA）在硅谷构建无人机管制平台（Unmanned Aircraft Systems Traffic Management）（Blake, 2021），用于实时监测运营的服务机器人的安全及运行状态等。



图 13 城市机器人利用垂直空间示意；Naver Robot-friendly Building

资料来源：Archdaily (2021)。

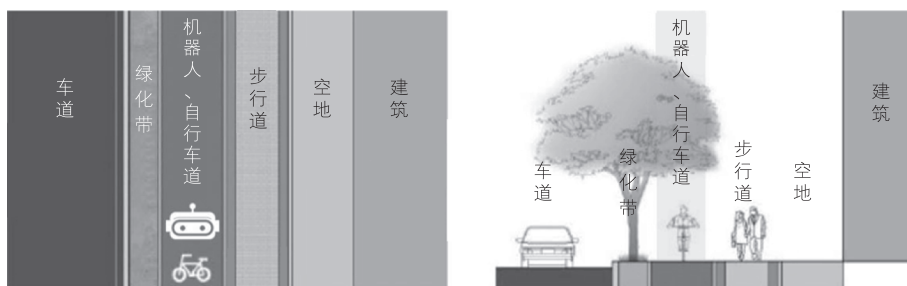


图 14 城市机器人利用地面空间示意；Smart City Korea

资料来源：Smart City Korea (2018)。

除去数字层面的基础设施提升，还需要新建实体基础设施用于机器人管理和使用，如作为室外机器人充电及提供服务场所的机器人服务站等，并有机会整合在既有城市设施中，如路灯、公交站台、长椅等智慧化街道家具。最终，城市机器人群体本身即为新型智慧基础设施的重要组成部分。

#### 4.2.3 完善公共空间治理规则

城市机器人对公共空间的占据存在着“空间商业化、不平等”等隐患，其在公共空间提供服务或与人交互时，可能会对其他人产生打扰和影响甚至排斥，从而影响该空间的公共属性。因此，除去对物理公共空间的再利用和再设计，在未来大量部署机器人时，公共空间的治理规则也亟须完善，包括规定不同公共空间的准入规则以及如何规范该空间内的行为。

在准入规则方面，结合托马斯森(Thomasen, 2020)的研究，可根据机器人功能分类管理机器人在公共空间的应用：一般情况下，机器人进入公共空间不应优先于人类，以保证弱势群体的公共权利；对于有助于增强空间可达性和公共性的机器人应用（如引导老人和视障人士的机器人）以及人类难以到达的空间（如空域）可适当放松准入规则，并构建空间移动规则，减少人与机器人的交叉冲突。在行为规范方面，要求机器人在满足正确的设计功能行为时还需满足法规管辖行为，甚至良好的社会行为（如为行人让路、与人类进行必要沟通等）(Loke, 2018)。

#### 4.2.4 设置优先试验区域

机器人的大面积部署将面临诸多实践中的困难，而这些问题需要在真实城市环境中解决，因此可通过开辟试验区域的方式实现城市机器人应用的空间过渡。在城市建成区内，优先考虑半控制半监管区域，如大学校园（加州大学伯克利分校的Kiwi食品配送机器人）、企业园区（Intuit园区Starship配送机器人）、特殊用途区（东京奥运会园区内提供各类机器人服务）(While et al., 2021)等。此外，新城与郊区的物理空间组成较为简单，也有潜力成为机器人试验区，如加州的郊区城市山景城(Mountain View)、雷德伍德城(Redwood city)以及英国新城米尔顿·凯恩斯(Milton Keynes)均开始进行城市机器人试验。这些区域内以汽车为主的基础设施较为简化，人行道更宽，行人更少，有利于降低机器人的部署难度(Valdez et al., 2021)。

## 5 总结与讨论

本文构建了基于描述城市机器人工作流程的特征分析框架，并详细介绍了其在六个应用领域的应用现状，得出目前城市机器人主要在街道空间进行活动，以轮式形态为主，多需要与人类接触互动，且具有数据共享趋势的特征结论。在此属性特征基础上总结城市机器人在城市空间中应用时面临的问题，包括：障碍繁杂，缺乏空间移动的结构和规则，与人和机器人易产生交叉冲突，计算压力大。技术与城市空间的适应是双向的，随着机器人进入城市领域，其完成任务所需要的空间也将不断依据城市的需求而变化，需要我们解决其空间问题也同时对其行为作出一定的限制。针对上述问题，结合落地实践或未来城市空间构想案例，本文提出城市空间应对的四个策略：营造无障碍专用空间，配套新

型智慧基础设施,完善公共空间治理规则,设置优先试验区域。

然而,城市空间正在被各类颠覆性技术和人们的生活方式重塑,机器人技术仅是其中一种,其发展速度和对空间的影响程度也尚未可知。同时,本文对不同领域机器人的空间影响同样缺乏更细致的分类探讨,针对其工作流程中各项具体技术所产生的空间影响和空间需求考虑有限。机器人应用对城市空间的影响路径还包括对人们生产生活方式的重塑,也有待后续研究深入地推演分析。

机器人技术已成为未来城市智慧化发展中的重要部分,城市自动化的趋势已势不可挡。规划人员应该超前认识到这些技术对于城市空间可能的影响以及给规划带来的挑战,理解、拥抱并利用新的技术和机遇,提升和丰富城市生活,最终营造高品质人居环境。

#### 参考文献

- [1] ABBASI M H, MAJIDI B, MANZURI M T. Deep cross altitude visual interpretation for service robotic agents in smart city[C]//2018 6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS). IEEE, 2018: 79-82.
- [2] BAKACH I, CAMPBELL A M, EHMKE J F. A two-tier urban delivery network with robot-based deliveries[J]. Networks, 2021, 78(4): 461-483.
- [3] BARDARO G, DAGA E, CARVALHO J, et al. Introducing a smart city component in a robotic competition: a field report[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2022: 24.
- [4] BEIGI N K, PARTOV B, FAROKHI S. Real-time cloud robotics in practical smart city applications[C]//2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2017: 1-5.
- [5] BILORIA N, DRITSA D. Social robotics and human computer interaction for promoting wellbeing in the contemporary city[C]//International Conference on Human-Computer Interaction. Springer, Cham, 2018: 110-124.
- [6] BLAKE T. What is unmanned aircraft systems traffic management? [EB/OL]. (2021-05-28)[2022-08-01]. <https://www.nasa.gov/ames/utm>.
- [7] BRUNO D R, DE ASSIS M H, OSÓRIO F S. Development of a mobile robot: robotic guide dog for aid of visual disabilities in urban environments[C]//2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE). IEEE, 2019: 104-108.
- [8] BYUN J, KIM S H, ROH M C, et al. Autonomous navigation of transport robot in the urban environment[C]//2010 15th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. IEEE, 2010: 76-81.
- [9] CALP M H, BUTUNER R, KOSE U, et al. IoT-based deep learning controlled robot vehicle for paralyzed patients of smart cities[J]. The Journal of Supercomputing, 2022: 1-36.
- [10] CAPI G, KITANI M, UEKI K. Guide robot intelligent navigation in urban environments[J]. Advanced Robotics, 2014, 28(15): 1043-1053.
- [11] CARGO SOUS TERRAIN. What is CST?[EB/OL]. (2017-03-01) [2022-08-01]. <https://www.cst.ch/en/what-is-cst/>.
- [12] CHOE Y, CHUNG M J. System and software architecture for autonomous surveillance robots in urban

- environments[C]//2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE, 2012: 535-536.
- [13] CITY OF NEW YORK. PlaNYC: a greener, greater New York[J]. City of New York, 2007.
- [14] CORNO M, SAVARESI S. Measuring urban sidewalk practicability: a sidewalk robot feasibility index[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2): 15053-15058.
- [15] DISSANAYAKE G, PAXMAN J, MIRO J V, et al. Robotics for urban search and rescue[C]//First International Conference on Industrial and Information Systems. IEEE, 2006: 294-298.
- [16] ERGIN E, AFONSO A G, SCHIECK A F G, et al. Welcoming the orange collars: robotic performance in everyday city life[C]//Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Pervasive Displays. 2018: 1-7.
- [17] ERMACORA G, TOMA A, ANTONINI R, et al. Leveraging open data for supporting a cloud robotics service in a smart city environment[M]//Intelligent Autonomous Systems 13. Springer, Cham, 2016: 527-538.
- [18] FILHO J F B, SIEBERT L C, MARIANI V C, et al. A conceptual model of a stereo vision system to aid a teleoperated robot in pruning vegetation close to overhead urban power lines[C]//2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). IEEE, 2018: 1119-1124.
- [19] FLECKENSTEIN J, MOLTER P L, CHOKHACHIAN A, et al. Climate-resilient robotic facades: architectural strategies to improve thermal comfort in outdoor urban environments using robotic assembly front[J]. Built Environment, 2022, 8: 856-871.
- [20] FÖRSTER F, WEISS A, TSCHELIGI M. Anthropomorphic design for an interactive urban robot—the right design approach?[C]//2011 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). IEEE, 2011: 137-138.
- [21] GEORGIEV A, ALLEN P K. Vision for mobile robot localization in urban environments[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2002, 1: 472-477.
- [22] GODDARD M A, DAVIES Z G, GUENAT S, et al. A global horizon scan of the future impacts of robotics and autonomous systems on urban ecosystems [J]. Nature Ecology & Evolution, 2021, 5(2): 219-230.
- [23] GOLUBCHIKOV O, THORNBUSH M. Artificial intelligence and robotics in smart city strategies and planned smart development[J]. Smart Cities, 2020, 3(4): 1133-1144.
- [24] GRAU A, BOLEA Y, PUIG-PEY A, et al. Robotic solutions for sewage systems in coastal urban environments[C]//OCEANS 2017-Aberdeen. IEEE, 2017: 1-5.
- [25] GRAU A, BOLEA Y, PUIG-PEY A, et al. Sustainable robotics solutions in smart cities. The challenge of the ECHORD++ project[C]//2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2018, 1: 1291-1296.
- [26] GRAVALOS I, AVGOUSTI A, GIALAMAS T, et al. A robotic irrigation system for urban gardening and agriculture[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2019, 50(4): 198-207.
- [27] GREAT LONDON AUTHORITY. Smarter London together[A]. London, UK, 2018.
- [28] GRIGORESCU S D, ARGATU F C, PATURCA S V, et al. Robotic platform with medical applications in the smart city environment[C]//2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE).

- IEEE, 2019: 1-6.
- [29] HASHIMOTO N, TOMITA K, KAMIMURA A, et al. Technology evaluations of personal mobility vehicles in Tsukuba-city mobility robot designated zone—an experimental approach for personal mobility for sharing[C]// 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). IEEE, 2014: 773-774.
- [30] HAYASHI K, SHIOMI M, KANDA T, et al. Are robots appropriate for troublesome and communicative tasks in a city environment?[J]. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, 2011, 4(2): 150-160.
- [31] HE X, BOURNE J R, STEINER J A, et al. Autonomous chemical-sensing aerial robot for urban/suburban environmental monitoring[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3): 3524-3535.
- [32] HOGGENMUELLER M, HESPAHOL L. Woodie, an urban robot for embodied hybrid placemaking[C]// Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. 2020: 617-624.
- [33] HOGGENMUELLER M, HESPAHOL L, WIETHOFF A, et al. Self-moving robots and pulverized urban displays: newcomers in the pervasive display taxonomy[C]//Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays. 2019: 1-8.
- [34] HÜTTENRAUCH H, EKLUNDH K S, GREEN A, et al. Investigating spatial relationships in human-robot interaction[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2006: 5052-5059.
- [35] KAPITONOV A, LONSHAKOV S, BERMAN I, et al. Robotic services for new paradigm smart cities based on decentralized technologies[J]. Ledger, 2019. DOI: 10.5195/ledger.2019.177.
- [36] KIM J. Naver says it's constructing world's first robot-friendly building [EB/OL]. (2021-07-05)[2022-08-01]. <https://www.kedglobal.com/artificial-intelligence/newsView/ked202107050013>.
- [37] KIM M S, CHA B K, PARK D M, et al. Dona: urban donation motivating robot[C]//2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). IEEE, 2010: 159-160.
- [38] LE N T, NGO T Q. Proposal of a sewerage cleaning robot to collect garbage applying for Ho Chi Minh City[C]//2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, 2019: 216-221.
- [39] LAVAEI A, ATASHGAH M A. Optimal 3D trajectory generation in delivering missions under urban constraints for a flying robot[J]. Intelligent Service Robotics, 2017, 10(3): 241-256.
- [40] LEONG W L, MARTINEL N, HUANG S, et al. An intelligent auto-organizing aerial robotic sensor network system for urban surveillance[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 102(2): 1-22.
- [41] LIU Y, ZHANG W, PAN S, et al. Analyzing the robotic behavior in a smart city with deep reinforcement and imitation learning using IoRT[J]. Computer Communications, 2020, 150: 346-356.
- [42] LIU Z Z, WANG Y J, LU T F. Odor source localization using multiple robots in complicated city-like environments[C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 291: 3337-3344.
- [43] LOKE S W. Are we ready for the internet of robotic things in public spaces?[C]//Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers. 2018: 891-900.
- [44] LOKE S W. Towards robotic things in society[J]. arXiv e-prints, 2019: arXiv: 1910.10253.

- [45] MACRORIE R, MARVIN S, WHILE A. Robotics and automation in the city: a research agenda[J]. *Urban Geography*, 2021, 42(2): 197-217.
- [46] MANYIKA J, CHUI M, BUGHIN J, et al. *Disruptive technologies: advances that will transform life, business, and the global economy*[M]. San Francisco, CA: McKinsey Global Institute, 2013.
- [47] MERINO L, GILBERT A, CAPITAN J, et al. Data fusion in ubiquitous networked robot systems for urban services [J]. *Annals of Telecommunications*, 2012, 67(7-8): 355-375.
- [48] MESSINA E R, JACOFF A S. Measuring the performance of urban search and rescue robots[C]//2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security. IEEE, 2007: 28-33.
- [49] NAGENBORG M. Urban robotics and responsible urban innovation[J]. *Ethics and Information Technology*, 2020, 22(4): 345-355.
- [50] PRATT S S, ALIBOZEK F, FROST T, et al. Applications of tactical mobile robot technology to urban search and rescue: lessons learned at the World Trade Center Disaster[C]//Unmanned Ground Vehicle Technology IV. SPIE, 2002, 4715: 13-20.
- [51] PUIG-PEY A, BOLEA Y, GRAU A, et al. Public entities driven robotic innovation in urban areas [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 92: 162-172.
- [52] RAHMAN A, JIN J, CRICENTI A, et al. A cloud robotics framework of optimal task offloading for smart city applications[C]//2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2016: 1-7.
- [53] RIVERA R, AMORIM M, REIS J. Robotic services in smart cities: an exploratory literature review[C]//2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). IEEE, 2020: 1-7.
- [54] ROLDÁN-GÓMEZ J J, GARCIA-AUNON P, MAZARIEGOS P, et al. Swarm City project: monitoring traffic, pedestrians, climate, and pollution with an aerial robotic swarm[J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2020, 26(4): 1-17.
- [55] SABATINI S, CORNO M, FIORENTI S, et al. Vision-based pole-like obstacle detection and localization for urban mobile robots[C]//2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2018: 1209-1214.
- [56] SABOORI P, MORRIS W, XIAO J, et al. Aerodynamic analysis of city-climber robots[C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2007: 1855-1860.
- [57] SALVINI P, TETI G, SPADONI E, et al. An investigation on legal regulations for robot deployment in urban areas: a focus on Italian law [J]. *Advanced Robotics*, 2010, 24(13): 1901-1917.
- [58] SANFELIU A, LLÁCER M R, GRAMUNT M D, et al. Influence of the privacy issue in the deployment and design of networking robots in European urban areas[J]. *Advanced Robotics*, 2010, 24(13): 1873-1899.
- [59] SATO-SHIMOKAWARA E, FUKUSATO Y, NAKAZATO J, et al. Context-dependent human-robot interaction using indicating motion via virtual-city interface[C]//2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE, 2008: 1922-1927.
- [60] SCHOLTZ J. Theory and evaluation of human robot interactions[C]//36th annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003. *Proceedings of the IEEE*, 2003: 10.
- [61] SHUT V, KASYANIK V. Mobile autonomous robots—a new type of city public transport[J]. *Transport and Telecommunication*, 2013, 14(1): 39-44.

- [62] SIDEWALK LABS. Toronto tomorrow: a new approach for inclusive growth[R]. Toronto: Sidewalk Labs, 2019.
- [63] SILVESTRI P, ZOPPI M, MOLFINO R. Dynamic investigation on a new robotized vehicle for urban freight transport[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2019, 96: 101938.
- [64] SINDI Y H O, ASCENCIO R L, EMES M. Towards ethics in robotic cities[C]//2018 IEEE Global Conference on Internet of Things (GCloT). IEEE, 2018: 1-7.
- [65] SMART CITY KOREA. Busan Eco Delta Smart City[EB/OL]. (2018-12-26)[2022-08-01]. <https://smartcity.go.kr/%ED%94%84%EB%A1%9C%EC%A0%9D%ED%8A%B8/%EA%B5%AD%EA%B0%80%EC%8B%9C%EB%B2%94%EB%8F%84%EC%8B%9C/%EB%B6%80%EC%82%B0-%EC%97%90%EC%BD%94%EB%8D%B8%ED%83%80-%EC%8A%A4%EB%A7%88%ED%8A%B8%EC%8B%9C%ED%8B%B0/>.
- [66] TAY T T, LOW R, LOKE H J, et al. Uncanny valley: a preliminary study on the acceptance of Malaysian urban and rural population toward different types of robotic faces[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, 344(1): 012012.
- [67] THOMASEN K. Robots, regulation, and the changing nature of public space[J]. Ottawa Law Review, 2020, 51(2): 275.
- [68] TIDDI I, BASTIANELLI E, DAGA E, et al. Robot-city interaction: Mapping the research landscape—a survey of the interactions between robots and modern cities[J]. International Journal of Social Robotics, 2020, 12(2): 299-324.
- [69] TOYOTA. TOYOTA woven city [EB/OL]. (2020-01-09)[2022-08-01]. <https://www.woven-city.global/>.
- [70] VALDEZ M, COOK M, POTTER S. Humans and robots coping with crisis—starship, COVID-19 and urban robotics in an unpredictable world[C]//2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, 2021: 2596-2601.
- [71] WEI Y, KOU X, LEE M C. Smart rope and vision based guide-dog robot system for the visually impaired self-walking in urban system[C]//2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2013: 698-703.
- [72] WHILE A H, MARVIN S, KOVACIC M. Urban robotic experimentation: San Francisco, Tokyo and Dubai[J]. Urban Studies, 2021, 58(4): 769-786.
- [73] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Global age-friendly cities: a guide[M]. World Health Organization, 2007.
- [74] WILLMANN J, GRAMAZIO F, KOHLER M. If robots conquer airspace: the architecture of the vertical city[J]. Future City Architecture for Optimal Living, 2015, 102: 1.
- [75] YOKOZUKA M, SUZUKI Y, HASHIMOTO N, et al. Robotic wheelchair with autonomous traveling capability for transportation assistance in an urban environment[C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2012: 2234-2241.
- [76] ArchDaily. “特斯联科技集团人工智能城市先行区 AI PARK/行之建筑设计工作室” [EB/OL]. (2021-12-16) [2022-08-01]. <https://www.archdaily.cn/cn/973635/te-si-lian-ke-ji-tuan-ren-gong-zhi-neng-cheng-shi-xian-xing-qu-ai-park-xing-zhi-jian-zhu-she-ji-gong-zuo-shi>.
- [77] 工信部. “十四五”机器人产业发展规划 [EB/OL]. (2021-12-21)[2022-08-01]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content\\_5664988.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664988.htm).



- [78]吴伟. 城市公共空间公共性及相关设计策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [77]徐一平, 董怀文. 服务机器人能为智慧城市做什么? [J]. 大数据时代, 2021(7): 6-1.
- [80]中国雄安. 地下管廊, 未来之城“大动脉”——“地下雄安”建设探访(二)[EB/OL]. (2020-11-10)[2022-08-01].  
[http://www.xiongan.gov.cn/2020-11/10/c\\_1210880046.htm](http://www.xiongan.gov.cn/2020-11/10/c_1210880046.htm).
- [81]周利敏, 钟海欣. 社会 5.0, 超智能社会及未来图景[J]. 社会科学研究, 2019(6): 1-9.

#### [欢迎引用]

- 梁佳宁, 龙瀛. 城市机器人的应用与空间应对研究综述[J]. 城市与区域规划研究, 2023, 15(1): 47-71.
- LIANG J N LONG Y. Review of studies on robot application in urban space and its response[J]. Journal of Urban and Regional Planning, 2023, 15(1): 47-71.